УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-2-7

Выбор метода расчета теплопоступлений от солнечной радиации для определения нагрузки на климатическую систему кабины мобильной машины

В. В. Масленский
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В статье проанализированы и выбраны наиболее рациональные методы расчета теплопритока от солнечной радиации. Правильный расчет этой составляющей теплового баланса позволяет верно определить мощность проектируемой климатической системы кабины, что обеспечит оптимальные условия труда на рабочем месте операторов мобильных машин.
Постановка задачи. Задачей данного исследования является анализ и выбор рационального метода расчета теплопоступлений от солнечной радиации для корректного определения тепловой нагрузки на климатическую систему кабины мобильной машины.
Теоретическая часть. Для реализации задачи были описаны и детально проанализированы наиболее распространенные методики расчета солнечной радиации и рекомендованы наиболее точные.
Выводы. Метод В. Н. Богословского (с учетом времени суток) можно рекомендовать для автоматизированных расчетов в Excel, а метод П. Ю. Гамбурга (с учетом сторон горизонта) — для сравнительных оценочных инженерных вычислений. При проведении «углубленных» модельных расчетов и учета солнечной радиации подходит методика ASHRAE, которая имеет два важных преимущества: учитывает солнечный фактор в привязке к конкретному виду остекления и адаптирована под автоматизированные расчеты в ANSYS FLUENT.

Ключевые слова: солнечная радиация, кабина, остекление, мобильная машина, климатическая система.

Для цитирования: Масленский, В. В. Выбор метода расчета теплопоступлений от солнечной радиации для определения нагрузки на климатическую систему кабины мобильной машины / В. В. Масленский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 4. — С. 2−7. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-2-7

Selection of a method for calculating heat gain from solar radiation to determine the load on the climate system of the cabin of a mobile car

V. V. Maslenskiy
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article analyzes and selects the most rational methods for calculating the heat gain from solar radiation. The correct calculation of this component of the heat balance allows you to correctly determine the power of the projected cabin climate system, which will ensure optimal working conditions at the workplace of mobile car operators.
Problem Statement. The objective of this study is to analyze and select a rational method for calculating heat gain from solar radiation for the correct determination of the thermal load on the climate system of the cabin of a mobile car.
Theoretical Part. To implement the task, the most common methods for calculating solar radiation were described and analyzed in detail and the most accurate ones were recommended.
Conclusions. The more labor-intensive method of V.N. Bogoslovskiy (taking into account the time of day) can be recommended for automated calculations in Excel, and the method of P.Y. Gamburg (taking into account the sides of the horizon) — for comparative estimated engineering calculations. When conducting "in-depth" model calculations and accounting for solar radiation, the ASHRAE method is explicitly suitable, which has two important advantages: it takes into account the solar factor in relation to a specific type of glazing and is adapted for automated calculations in ANSYS FLUENT.

Keywords: solar radiation, cabin, glazing, mobile car, climate control system.

For citation: V. V. Maslenskiy. Selection of a method for calculating heat gain from solar radiation to determine the load on the climate system of the cabin of a mobile car. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021; 4: 2−7. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-2-7

Введение. Солнечная радиация составляет значительную часть притока тепла в кабину мобильных машин (70–80 %) [1, 2]. Это доказывает, что точность определения тепловой нагрузки на климат-систему кабины зависит от составляющей баланса Q_5 — солнечной радиации. Поэтому необходимо подробнее остановиться на ее определении, проанализировав различные расчетные методы и методики. Тем более, что результаты расчетов имеют весьма значительные расхождения между собой. Полученная по методике [3, 4] величина солнечной радиации процентов на 30 % превышает аналогичную, полученную по более современным методикам, например, по методике ASHRAE.

Свето- и теплопрозрачные стенки кабины являются наиболее распространенными путями проникновения солнечной радиации, часть которой (коротковолновое излучение) без преград попадает в кабину, а другая часть (конвективное тепло) — поглощается стеклами и за счет разности температур поступает внутрь. На рис. 1 представлена схема тепловлажностного баланса кабины мобильной машины.

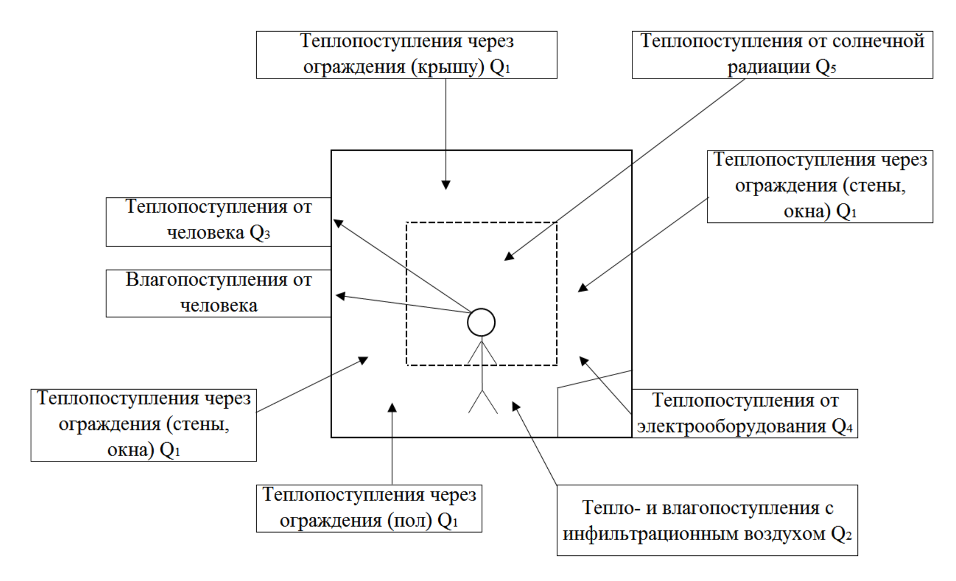


Рис. 1. Расчетная модель тепло- и влаго поступлений в кабину мобильной машины в летний период года

Помимо теплопритока от солнечной радиации Q_5, наиболее значащими в тепловом балансе выступают теплопритоки через ограждающие поверхности Q_1; от инфильтрируемого воздуха Q_2; от оператора Q_3; от осветительных и электроприборов Q_4 [5–8].

Постановка задачи. Задачей данного исследования является анализ и выбор рационального метода расчета теплопоступлений от солнечной радиации для корректного определения тепловой нагрузки на климатическую систему кабины мобильной машины.

Теоретическая часть. Основные методы расчета поступлений тепла от солнечной радиации следующие.

Метод 1

Берутся во внимание лишь те ограждения, которые обращены к солнцу. Притоки тепла от солнечного излучения с учетом степени пропускания солнечных лучей:

$$Q_5 = (A_к \cdot I \cdot K_k \cdot F_k)/\alpha_н + I \cdot K_б \cdot F_б + I \cdot K_ф \cdot F_ф, \quad (1)$$

где $A_к$ — доля поглощения солнечных лучей крышей кабины; I — интенсивность излучения; $K_к$ — коэффициент теплопередачи крыши, Вт/(м^2·К); $K_б$ и $K_ф$ — коэффициенты пропускания солнечных лучей стеклами, равные $K_ф = 0{,}46$; $K_б = 0{,}8$; $F_к$, $F_б$ и $F_ф$ — площади крыши и окон на боковой и фронтальной стенке, м^2.

Данный метод дает в расчетах погрешность, связанную с тем, что стенки, не обращенные к солнцу (боковая, задняя и пол), находятся под действием только рассеянного солнечного излучения, величина которого незначительна [2, 9, 10].

Прирасчетах скорость наружного воздуха была задана 0 м/с, а внутреннего воздуха принималась 1,5 м/с. В таком случае суммарный приток тепла от солнечного излучения составил Q_5 = 2 603 Вт.

Суммарный приток тепла сквозь световые проемы кабины составил: $Q_{рад}^{стекло} = 1155 + 1040 = 2195$ Вт.

Метод 2

Основан на расчете притока тепла от солнечного излучения через стекла кабины по методу, разработанному П. Ю. Гамбургом (с применением коэффициентов затенения) [6].

Суммарный приток тепла в кабину Q_{1c} (в Вт) включает в себя приток тепла сквозь непрозрачные стенки и приток тепла сквозь световые проемы, т.е.

$$Q_{1c} = Q_{1c}^{масс} + Q_{1c}^{свет}. \quad (2)$$

$Q_{1c}^{свет}$ (Вт) рассчитывают для каждой стороны света:

$$Q_{1c}^{свет} = Q_{ок} \cdot F \cdot \tau, \quad (3)$$

где $Q_{ок}$ — удельный приток тепла через одинарное стекло, Вт/м^2; F — площадь окна, м^2; τ — коэффициент затенения окна затеняющим устройством.

В нашем случае коэффициенты τ выбираем из таблицы 1 по данным поставщика из технических характеристик стекол для кабины мобильной машины.

Таблица 1

Технические характеристики стекол

Стекло	Толщина, мм	Светопропускание, LT, %	Пропускание солнечной энергии, ET,%	Поглощение солнечной энергии, EA, %	Отражение света, LR, %	Отражение ИК излучения солнца, % (оценочно)
Бесцветное	4	90	83	9	8	7
	6	89	80	12	8	6
Planibel AGC зеленое	4	80	56	38	7	6
	6	74	46	48	7	6
Planibel AGC голубое	6	73	45	45	7	6
Planibel Torn	6	78	64	20	13	8
Pilkington, K-glass	4	82	61	9	11	19
	6	81	58	12	11	19
Pilkington, I-glass	4	86	61	5	9	26

Величины $Q_{ок}$ даны в справочных таблицах в [6]. При этом, в расчет берут наибольший приток тепла. Результаты расчетов притоков тепла от солнечного излучения сквозь окна кабины по методу П. Ю. Гамбурга на географической широте 45° расположения кабины при разных ее ориентациях по сторонам горизонта представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчет притоков тепла от солнечного излучения через световые проёмы,
г. Краснодар (широта 45°)

Кабины	Стороны горизонта	Тип остекления	Площадь светового проема, м^2	Теплоприток по таблице	Коэффициент затенения, τ	$Q_{1c}^{свет}$, Вт
Ориентация на Юг						
1-й вариант кабины	Юг	Planibel AGC зеленое	2,41	300	0,74	528,4
	Север	Planibel AGC зеленое	1,41	58	0,74	60,5
	Восток	Бесцветное	1,52	315	0,89	426,1
	Запад	Бесцветное	1,52	315	0,89	426,1
					Сумма	1 442
Ориентация на Юго-Восток						
1-й вариант кабины	Ю-Запад	Бесцветное	1,52	270	0,89	365,3
	С-Восток	Бесцветное	1,52	165	0,89	223,2
	Ю-Восток	Planibel AGC зеленое	2,41	270	0,74	475,5
	С-Запад	Planibel AGC зеленое	1,41	165	0,74	172,2
					Сумма	1 236
Ориентация на Юг						
2-й вариант кабины	Юг	Planibel AGC зеленое	2,41	300	0,74	528,4
	Север	Planibel AGC зеленое	0,41	58	0,74	17,6
	Восток	Бесцветное	1,52	315	0,89	426,1
	Запад	Бесцветное	1,52	315	0,89	426,1
					Сумма	1 399

Метод 3 (через затенение)

Расчет теплопритоков от солнечной радиации по ГОСТ14 269–03 и СТО 11765852–02–2016 [3]. Теплопоступления от солнечной радиации Q_{1c} состоят из теплопоступлений через массивные ограждения кабины и теплопоступлений через световые проёмы (формула (2)). Определение теплопритока от радиации через световые проёмы рабочего места по формуле:

$$Q_{1c}^{свет} = I \cdot \sum_i (1 - K_i) \cdot F_i, \quad (4)$$

где I — интенсивность солнечного излучения; K_i — коэффициент затенения i-го ограждения; F_i — площадь i-го светового проема, м^2.

Учитывая затененность стекол кабины мобильной машины, определим теплопритоки от солнечной радиации через световые проёмы:

$$Q_{1c}^{свет} = 950 \cdot (1 - 0{,}74) \cdot (2{,}41 + 3{,}8 + 1{,}4) = 2169 \text{ Вт}.$$

Тогда теплоприток от теплопередачи через массивные ограждения равен:

$$Q_{1c}^{потолок} = K \cdot F \cdot \Delta t; \quad (5)$$

$$Q_{1c}^{потолок} = 1{,}87 \cdot 2{,}3 \cdot 21 = 91 \text{ Вт}.$$

Суммарные теплопритоки через стекло составили 2 260 Вт.

Метод 4

Расчет по методике В. Н. Богословского [1, 10].

Суммарный теплоприток, проникающий в кабину сквозь световые проемы, Вт/м^2:

$$q_{\sum} = q_{с.и.} + q_{т.п.}. \quad (6)$$

Теплоприток от солнечного излучения в случае расположения окна кабины вертикально равен, Вт/м^2:

$$q_{с.и.} = \left(q_{пр} \cdot K_{инс} + q_{рас} \cdot K_{обл}\right) K_{отн} \cdot \tau_2, \quad (7)$$

где $q_{пр}$, $q_{рас}$ — теплоприток, учитывающий прямое и рассеянное солнечное излучение, Вт/м^2; $K_{обл}$, $K_{отн}$ — коэффициенты облучения и относительного проникновения солнечного излучения соответственно; τ_2 — коэффициент затенения светового проема переплетами; $K_{инс}$ — коэффициент инсоляции, определяемый в соответствии с формулой:

$$K_{инс} = \left(1 - \frac{L_г \operatorname{ctg} \beta - a}{H}\right)\left(1 - \frac{L_в \operatorname{tg} A_{с.о.} - c}{B}\right), \quad (8)$$

где $L_г$, $L_в$ — ширина горизонтальных и вертикальных затеняющих устройств, м; β — угол между поверхностью окна и перпендикулярной ей проекции солнечного луча, в градусах; $A_{с.о.}$ — солнечный азимут остекления; a, c — расстояния между затеняющими устройствами и окном, м; H, B — высота и ширина окна соответственно, м.

Результаты расчета суммарного теплопритока, проникающего в кабину сквозь световые проемы, а также график изменения теплопоступлений от солнечной радиации по часам суток в летний наиболее жаркий месяцпо данной методике представлены на рис. 2.



Рис. 2. Поступления тепла в кабину от солнечного излучения по часам суток в июле

Метод 5

Расчет по методике, предложенной American society of heating, refrigerating and air-condition ingengineers, ASHRAE [7].

Приток тепла от прямого солнечного излучения $Q_п$ равен:

$$Q_п = S \cdot SHGC(\theta) \cdot IAC(\theta, \Omega) \cdot F_п, \quad (9)$$

где S — поток тепла от прямого солнечного излучения, Вт/м², попадающий на стенку, принимаемый равным в зависимости от географического местоположения, времени суток и ориентации кабины; SHGC(θ) — коэффициент притока тепла (solarheat gain coefficient) от прямого солнечного излучения, зависящий от технических характеристик стеклопакета и угла падения θ; IAC(θ, Ω) — затухания внутри кабины коэффициента притока тепла (indoor solarattenuation coefficient) от прямого солнечного излучения, зависящий от θ, наличия внутренних солнцезащитных устройств и теневого угла Ω — угла между горизонтальной плоскостью остекления и проекцией солнечного луча на вертикальную плоскость, перпендикулярно рассматриваемой плоскости остекления; $F_П$— площадь остекления, м².

Преимуществом описанной методики является то, что определение притока тепла производится относительно потока, падающего на стенку, а величина проникающей внутрь кабины лучистой энергии рассчитывается за счет коэффициента теплопритока SHGC и коэффициента затухания коэффициента теплопритока IAC. В связи с этим необходимо дать определение термину «солнечный фактор». Под ним (g) подразумевается отношение суммарного потока тепла, проникающего в кабину, к потоку падающего солнечного излучения (рис. 3) [7].

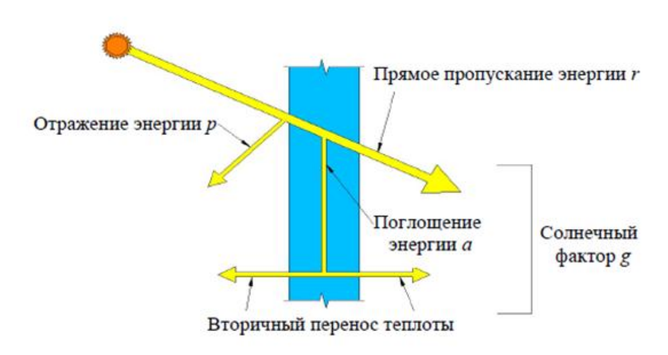


Рис. 3. Физический смысл солнечного фактора [7]

Солнечный фактор является одним из основных параметров, приводимых в технических характеристиках на стеклопакет [7]. В таком случае солнечный фактор дает реальную привязку к определенному типу стекла с учетом прямого и рассеянного солнечного излучения, проникающего в кабину, что исключает необходимость учета дополнительных значений $q_п$ и $q_р$. При этом формула для теплопритока от рассеянного солнечного излучения трансформируется:

$$Q_р = (S \cdot K_{инс} + 0{,}75D \cdot K_{обл}) \cdot g \cdot k_{СЗУ} \cdot \tau_2 \cdot F_п, \quad (10)$$

где g — солнечный фактор стекла; $k_{СЗУ}$ — коэффициент пропускания тепла солнцезащитными устройствами.

Также отметим, что в программный комплекс ANSYS внедрены основные принципы методики ASHRAE, что делает ее привлекательной для проведения практических модельных расчетов. В модели солнечной нагрузки имеется возможность получения данных о величине солнечного излучения в конкретный период времени с помощью программы «солнечный калькулятор».

Сведем итоговые величины поступлений тепла от солнечного излучения на рабочее место оператора мобильной машины, рассчитанные по различным методикам в таблицу 3.

Таблица 3

Итоговые величины теплопритоков от солнечной радиации

Метод расчета	Без учета сторон горизонта	ГОСТ 14269-03, без учета сторон горизонта	Метод П. Ю. Гамбурга с учетом сторон горизонта	Метод В. Н. Богословского с учетом сторон горизонта и часового расположения
Теплопоступление от солнца, Вт	2 195	2 260	1 394	1 346

Выводы. При определении теплопоступлений от солнечной радиации методами, не учитывающими стороны горизонта и время дня, величина теплопоступления оказывается значительно больше, чем с их учетом (таблица 3). Методы, в основе которых не заложен учет сторон горизонта, нецелесообразно использовать в инженерных расчетах из-за примитивного подхода и, как следствие, «грубости» определения расчетных величин. Они, как правило, дают завышенные почти в 2 раза значения. Напротив, методы В. Н. Богословского (учет времени суток) и П. Ю. Гамбурга с учетом сторон горизонта дают практически одинаковые результаты

(разница в 48 Вт), что доказывает правильность определения расчетных величин. Методика ASHRAE имеет два преимущества — она не только учитывает солнечный фактор конкретного остекления, но и адаптирована под автоматизированные расчеты в ANSYS FLUENT.

Для расчета общих теплопоступлений от солнечной радиации можно рекомендовать метод П. Ю. Гамбурга [6], который применим для сравнительных оценочных инженерных вычислений в связи с его несложностью, в сравнении с методом В. Н. Богословского. Более трудоемкий метод В. Н. Богословского (с учетом времени суток) можно рекомендовать для автоматизированных расчетов в Excel.

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 3, показывает, что наибольшее значение теплопритоков для летнего режима имеет место от солнечной радиации и составляет 1 393,2 Вт. При скорости наружного воздуха 2,7 м/с основным является трансмиссионный теплоприток, равный 914,1 Вт, меньшее значение имеют эксплуатационные теплопритоки. Полученные данные необходимы для определения расхода воздуха и нагрузки на подбираемое теплообменное оборудование. Для расчета выбираем наибольшее значение при скорости наружного воздуха 2,7 м/с.

При проведении модельных компьютерных расчетов и учете солнечной радиации хорошо подходит методика ASHRAE. Она имеет два важных преимущества — учитывает солнечный фактор в привязке к конкретному виду остекления и адаптирована под автоматизированные расчеты в ANSYS FLUENT.

Библиографический список

1. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн.1 / В. Н. Богословский, А. И. Пирумов, В. Н. Посохин [и др.]. Под ред. Н. Н. Павлова и Ю. И. Шиллера. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Стройиздат, 1992. — 319 с.

2. Михайлов, М. В. Микроклимат в кабинах мобильных машин / М. В. Михайлов, С. В. Гусева. — Москва : Машиностроение, 1977. — 230 с.

3. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05–91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : https://docs.cntd.ru/ : [сайт]. — URL : https://docs.cntd.ru/document/1200007436 (дата обращения : 23.06.2021).

4. Расчет теплопоступлений в кабины мобильных энергетических средств / А. П. Савельев, С. В. Глотов, С. А. Еналеева, В. А. Васькянин // Наука, техника и образование. — 2018. — № 6 (47). — С. 22–28.

5. Исследования герметичности кабин сельскохозяйственной техники с помощью индикаторных показателей / С. А. Родимцев, А. И. Гавриченко, И. В. Гальянов, Р. П. Беликов // Вестник НГИЭИ. — 2017. — № 12 (79). — С. 53−63.

6. Гамбург, П. Ю. Расчет солнечной радиации в строительстве : учет тепла, вносимого солнечной радиацией / П. Ю. Гамбург. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Стройиздат, 1966. — 140 с.

7. ASHRAE Handbook. Fundamentals / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers // www.academia.edu : [сайт]. — URL: https://www.academia.edu/39168321/Inch_Pound_Edition_2009_ASHRAE_HANDBOOK_FUNDAMENTALS (дата обращения : 23.06.2021).

8. Гусева, С. В. Исследование и улучшение микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна: дис. … к-та тех. наук / С. В. Гусева. — Москва, 1974. — 170 с.

9. Булыгин, Ю. И. Разработка элементов системы нормализации микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна TORUM / Ю. И. Булыгин, Е. В. Щекина, В. В. Масленский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2019. — № 2. — С. 2–12.

10. Масленский, В. В. Эффективность солнцезащиты кабины мобильной сельскохозяйственной машины / В. В. Масленский, Ю. И. Булыгин // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: юбилейный сб. науч. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., посв. 90-летию ДГТУ (РИСХМ): в 2-х т. Т. 2. — Ростов-на-Дону : ДГТУ-Принт, 2020. — С. 28–31.

Поступила в редакцию 09.08.2021
Поступила после рецензирования 30.08.2021
Принята к публикации 31.08.2021

Об авторах:

Масленский Виктор Валерьевич, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4618-029X, vicleng@mail.ru